

## STUDI TEKNOLOGI DAUR BAHAN BAKAR DUPIC

Erlan Dewita<sup>\*</sup>, Siti Alimah<sup>\*</sup>

### ABSTRAK

**STUDI TEKNOLOGI DAUR BAHAN BAKAR DUPIC.** Pada umumnya bahan bakar bekas masih mengandung bahan fisil dengan jumlah yang cukup signifikan. Kandungan bahan fisil yang terdapat pada bahan bakar bekas reaktor LWR ( $\pm 1,5\%$ ) lebih besar dibanding kandungan bahan fisil yang terdapat pada uranium alam ( $\pm 0,71\%$ ). CANDU merupakan jenis reaktor berpendingin dan bermoderator air berat ( $D_2O$ ) serta dapat beroperasi dengan bahan bakar oksida dengan kandungan bahan fisil yang rendah (uranium alam). Kemampuan CANDU untuk beroperasi dengan kandungan bahan fisil yang rendah memberikan sinergisme antara reaktor LWR dan CANDU. Daur bahan bakar DUPIC (*Direct Use of PWR spent fuel In CANDU*) merupakan daur bahan bakar tertutup yang pengembangannya berbasis pada fleksibilitas daur bahan bakar CANDU. Pada daur bahan bakar DUPIC, bahan bakar bekas PWR dapat digunakan secara langsung hanya dengan proses mekanik-termal tanpa dilakukan pemisahan secara kimia, sehingga dipandang menguntungkan baik dari segi ekonomi maupun keamanan sehubungan dengan penggunaan plutonium untuk persenjataan nuklir. Namun demikian, tantangan yang harus dihadapi dalam fabrikasi bahan bakar DUPIC adalah disebabkan radioaktivitas yang tinggi dari bahan bakar bekas, sehingga semua proses fabrikasi harus dilakukan dalam *hot cell*.

### ABSTRACT

Study of DUPIC fuel cycle technology. In general, nuclear spent fuel is significantly still contain fissile materials. The Content of fissile material in LWR spent fuel ( $\pm 1,5\%$ ) is higher than in natural uranium that is 0,71%. CANDU reactors are heavy-water cooled and moderated and utilize natural uranium  $UO_2$  as fuel. Ability of CANDU to operate with low-fissile content fuel suggests a unique synergism between light water reactor (LWR) and CANDU reactor. DUPIC (Direct Use of PWR spent fuel In Candu) fuel cycle is closed fuel cycle that is developed from flexibility of CANDU fuel cycle. In DUPIC fuel cycle, PWR spent fuel can directly use only without chemical processing. It use dry process which is mechanic – thermal process, so it have some advantage in economic and safeguard in view of points due to plutonium for nuclear weapon. Otherwise, It have a challenge because of high radioactivity of spent fuel, therefore DUPIC fuel fabrication has should be conducted in hot cell facility.

---

<sup>\*</sup> Staf Bidang Pengembangan Sistem dan Teknologi PLTN

## I. PENDAHULUAN

Bahan bakar nuklir bekas merupakan salah satu produk samping dari reaktor daya yang menggunakan bahan fisil uranium dan plutonium untuk menghasilkan energi listrik. Pada umumnya bahan bakar bekas dianggap masih sangat bernilai karena mengandung sejumlah isotop U-235 yang tidak terbakar dan isotop plutonium Pu-239 yang terbentuk akibat absorpsi neutron oleh isotop U-238. Jika dibandingkan dengan uranium alam yang mengandung 0,7% U-235, maka kandungan bahan fisil yang terdapat pada bahan bakar bekas dari reaktor jenis PWR sekitar 2 kali lebih banyak yaitu 1,5% ( 0,9% U-235 dan 0,6% Pu-239). Sehingga bahan bakar bekas dipandang masih bisa digunakan kembali untuk berbagai reaktor termal konvensional (LWR, HWR), reaktor maju berbahan bakar MOX, ataupun reaktor cepat berbahan bakar plutonium.

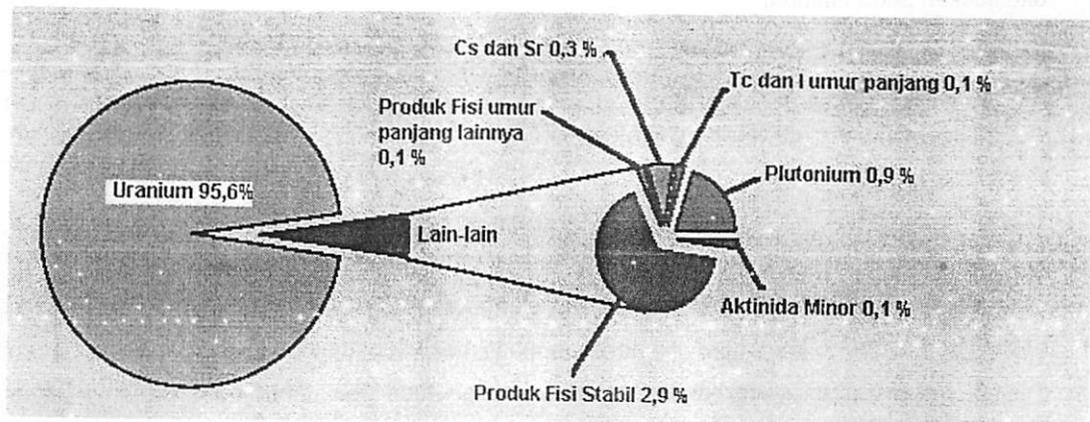
Model manajemen bahan bakar bekas setelah keluar dari reaktor dibagi menjadi 2, yang pertama " daur bahan bakar sekali pakai " (*once through fuel cycle*) dimana pada model ini bahan bakar bekas setelah keluar dari reaktor tidak dilakukan proses olah ulang, tetapi langsung disimpan baik pada penyimpanan sementara atau penyimpanan lestari. Model yang kedua adalah " daur bahan bakar tertutup " (*closed fuel cycle*) dimana pada model ini uranium dan plutonium dipungut dari bahan bakar bekas melalui proses olah ulang dan didaur ulang untuk difabrikasi menjadi bahan bakar baru. Ditinjau dari pertimbangan aspek ekonomi, maka proses olah ulang untuk memungut kembali bahan fisil dipandang menguntungkan, sebab akan menghemat cadangan uranium alam. Namun demikian, proses olah ulang untuk memungut isotop plutonium fisil dapat beresiko untuk diselewengkan ke arah persenjataan nuklir.

Penelitian dan pengembangan terhadap daur bahan bakar tertutup terus dilakukan di beberapa negara maju, seperti : Canada, Amerika, Jepang dan Korea. Dengan pertimbangan ekonomi dan kekhawatiran dunia terhadap penggunaan plutonium untuk persenjataan nuklir, maka akhir-akhir ini sedang diteliti dan dikembangkan daur bahan bakar DUPIC (*Direct Use of PWR spent fuel In Candu*). Dalam rangka untuk mendapatkan informasi dan pemahaman mengenai daur bahan bakar DUPIC, dalam makalah ini akan dilakukan studi mengenai daur bahan bakar tersebut melalui kajian dengan harapan dapat menjadi masukan dalam opsi manajemen bahan bakar bekas di Indonesia.

## II. Bahan Bakar Nuklir Bekas

Sampai saat ini umumnya bahan bakar nuklir digunakan dalam reaktor selama 18 bulan baik untuk reaktor jenis LWR maupun untuk jenis CANDU yaitu sampai bahan bakar masih efektif dalam menghasilkan energi. Menurunnya efektivitas bahan bakar dalam menghasilkan energi disebabkan oleh terbentuknya produk fisi dalam bahan bakar selama reaktor beroperasi. Proses fisi dari isotop uranium dan plutonium dalam bahan bakar uranium dioksida (UO<sub>2</sub>) akan menghasilkan sekitar seratus jenis produk fisi utama yang beberapa diantaranya tidak stabil dan akan menghasilkan isotop lain melalui reaksi peluruhannya. Produk fisi yang paling banyak adalah gas Xe dan Kr, sebagian besar produk fisi gas ini tertahan dalam pori-pori material bahan bakar. Namun fraksi tertentu dari produk fisi gas ini akan lepas menuju volume kosong yang ada pada

batang bahan bakar dan menyebabkan peningkatan tekanan bagian dalam (*internal pressure*) yang bisa mempengaruhi integritas kelongsong bahan bakar. Pelepasan gas hasil fisi merupakan fenomena yang membatasi umur bahan bakar [1]. Bahan bakar yang telah dikeluarkan dari reaktor setelah umur bahan bakar berakhir disebut sebagai bahan bakar bekas. Pada umumnya kandungan awal bahan fisil dalam bahan bakar  $UO_2$  untuk reaktor jenis LWR adalah 3,5% U-235, tergantung pada pengayaan bahan bakar. Selama iradiasi, sebagian besar U-235 mengalami proses fisi atau pembelahan dan sebagian kecil U-238 ditransmutasi menjadi unsur-unsur transuranium, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Bahan bakar nuklir bekas mengandung 95,6% uranium (sebagian besar U-238), sekitar 0,9% plutonium, 0,1% minor aktinida, 0,1% Tc dan I umur panjang, 0,3% Cs dan Sr, 0,1% produk fisi umur panjang lainnya serta 2,9% produk fisi stabil.



Gambar 1. Konstituen dari Bahan Bakar Nuklir Bekas [2]

Namun demikian tergantung pada derajat bakar dan pada umumnya bahan bakar bekas PWR masih mengandung bahan fisil ~ 1,5% ( 0,9% U-235 dan 0,6% Pu-239). Sedangkan kandungan bahan fisil awal dalam bahan bakar Candu adalah 0,71% dan pada bahan bakar bekas Candu adalah 0,5% ( 0,23% U-235 dan 0,27 % Pu-239).[3]

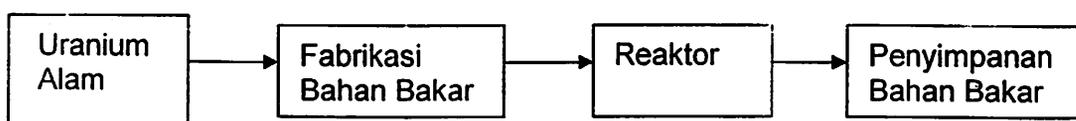
### III. Sistem Daur Bahan Bakar Nuklir

Daur Bahan Bakar Nuklir termasuk semua aktivitas yang meliputi beberapa tahap yaitu mulai dari penambangan, sampai proses iradiasi bahan bakar dalam reaktor nuklir, serta memproses bahan bakar bekas dan pengelolaan limbah produk fisi yang dihasilkan selama proses iradiasi dalam reaktor. Beberapa aktivitas yang termasuk dalam daur bahan bakar dibagi menjadi 3 katagori. Katagori pertama meliputi semua aktivitas yang berlangsung sebelum iradiasi bahan bakar yaitu *mining*, *milling*, konversi menjadi Uranium Hexafluoride ( $UF_6$ ), pengayaan isotop U-235 dan fabrikasi serta perakitan bahan bakar. Aktivitas ini disebut sebagai daur bahan bakar ujung depan. Katagori kedua, meliputi semua aktivitas mengenai disain daur bahan bakar dan iradiasi rakitan bahan bakar dalam reaktor termasuk evaluasi reaktivitas dan persyaratan kontrol, pemrograman rakitan bahan bakar dalam reaktor, analisis distribusi daya dan evaluasi kemampuan teras. Aktivitas-aktivitas ini disebut sebagai daur bahan bakar bagian tengah. Katagori ketiga dari

daur bahan bakar meliputi penanganan bahan bakar bekas yang sangat radioaktif. Aktivitas ini meliputi penyimpanan sementara bahan bakar bekas, pemrosesan bahan bakar bekas untuk memungut produk fisi dan memisahkan unsur-unsur transuranium serta penyimpanan lestari. Aktivitas-aktivitas ini disebut sebagai daur bahan bakar ujung belakang. Pada umumnya model manajemen bahan bakar bekas setelah keluar dari reaktor dibagi menjadi 2, yaitu *once through cycle* (daur bahan bakar sekali pakai) dan *closed fuel cycle* (daur bahan bakar tertutup).

### III.1. Daur Bahan Bakar Sekali Pakai (*Once Through Cycle*)

Model *once through cycle* (daur bahan bakar sekali pakai) atau sering disebut dengan daur bahan bakar terbuka merupakan model yang paling umum dan sederhana. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

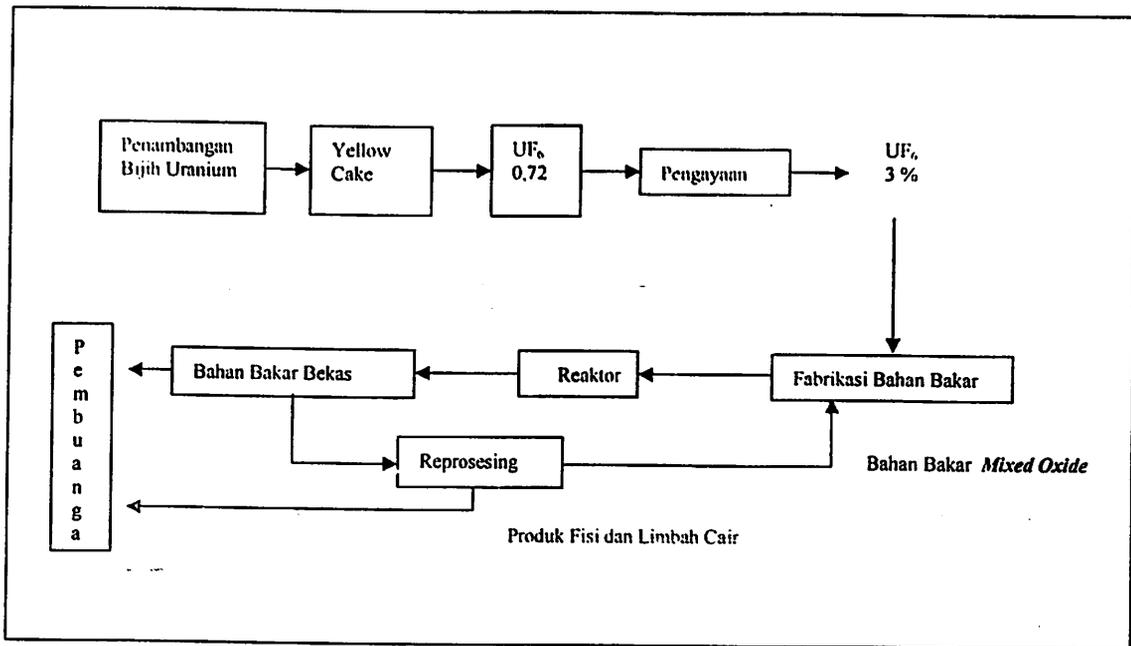


Gambar 2. Daur Bahan Bakar Sekali Pakai [3]

Pada model ini tidak dilakukan proses olah ulang karena tidak ada konstituen dari bahan bakar bekas yang di daur ulang untuk digunakan kembali menjadi bahan bakar. Bahan bakar baru masuk reaktor, sekali bahan bakar digunakan dan setelah mencapai umur pemakaiannya, kemudian dipindahkan secara permanen untuk penyimpanan sementara atau penyimpanan lestari.

### III.2. Daur Bahan Bakar Tertutup (*Closed Fuel Cycle*)

Manajemen bahan bakar bekas alternatif, selain menyimpan adalah dengan cara melakukan proses olah ulang terhadap bahan bakar bekas untuk memungut uranium yang tidak terbakar dan bahan fisi plutonium yang terbentuk selama iradiasi dalam reaktor untuk difabrikasi ulang menjadi bahan bakar oksida atau bahan bakar campuran (MOX). Model ini ditunjukkan pada Gambar 3. Model daur bahan bakar yang menggunakan proses olah ulang ini disebut dengan daur bahan bakar tertutup.



Gambar 3. Model Daur Bahan Bakar Tertutup[4]

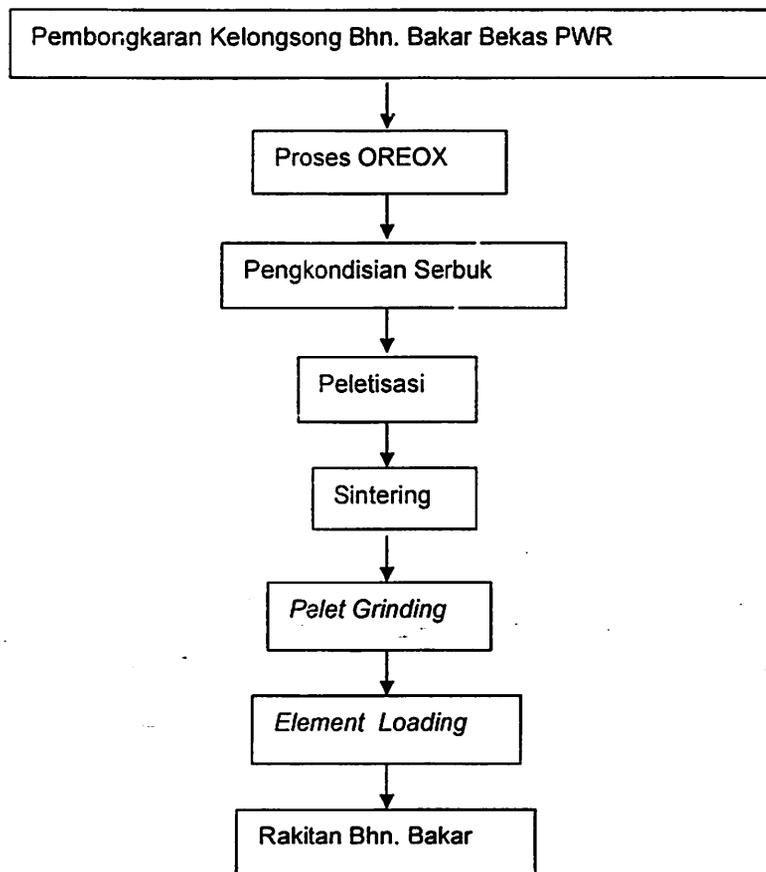
Jenis reaktor yang umum menggunakan bahan bakar MOX adalah LWR (*Light Water Reactor*), dan Reaktor Pembiak Cepat (*Fast Breeder Reactor*). Selain daur bahan bakar LWR, dengan berbasis pada fleksibilitas daur bahan bakar CANDU akhir-akhir ini dikembangkan daur bahan bakar DUPIC (*Direct Use of PWR Spent Fuel In Candu*) dan daur bahan bakar reaktor subkritis (akselerator).

### III.3. Daur Bahan Bakar DUPIC

Reaktor CANDU merupakan jenis reaktor yang memiliki konsep yaitu ekonomi neutron yang tinggi sehingga reaktor dapat beroperasi menggunakan bahan bakar oksida dari uranium alam dengan kandungan bahan fisil ( $U-235$  0,7%), bermoderator dan berpendingin air berat ( $D_2O$ ). Kebutuhan bahan fisil yang rendah ini yang mendasari sinergi antara reaktor jenis PWR dan CANDU, sebab kandungan bahan fisil yang terdapat dalam bahan bakar bekas PWR adalah 1,5 % sehingga dapat digunakan untuk bahan bakar reaktor CANDU dengan tanpa pengayaan [5]. Berbasis pada sinergisme tersebut, akhir-akhir ini dikembangkan daur bahan bakar DUPIC dimana pada daur ini, bahan bakar bekas PWR dapat digunakan secara langsung hanya dengan proses pemisahan cara kering atau cara basah untuk memindahkan bahan fisil maupun produk fisi. Karena itu daur bahan bakar DUPIC tersebut dapat dijadikan sebuah alternatif terhadap opsi manajemen bahan bakar bekas konvensional yaitu penyimpanan langsung atau mendaur ulang plutonium menggunakan proses olah ulang cara basah (*wet reprocessing*).

Diagram alir proses fabrikasi bahan bakar DUPIC ditunjukkan pada Gambar 4. Proses fabrikasi dimulai dengan proses pembongkaran dan pelepasan kelongsong, kemudian dilakukan proses pemisahan cara kering (*dry processing*) yang disebut sebagai proses OREOX. Proses ini

merupakan inti dari proses bahan bakar DUPIC yaitu dengan proses oksidasi (temperatur  $\pm 500^{\circ}\text{C}$ ) – reduksi kering (temperatur  $\pm 700^{\circ}\text{C}$ ) dengan tujuan selain untuk mengkonversi pelet bahan bakar bekas menjadi serbuk juga untuk menguapkan produk fisi yang bersifat volatil. Pada kondisi reduksi,  $\text{UO}_2$  mempunyai bentuk stabil, sedang pada kondisi oksidasi fase stabil dalam bentuk  $\text{U}_3\text{O}_8$ . Dalam mentransformasi  $\text{UO}_2$  menjadi  $\text{U}_3\text{O}_8$ , matriks mengalami perubahan masa (dari *cubic* menjadi *orthorombic*) disertai dengan perubahan densitas, dan akhirnya terjadi perubahan volume ( $\pm 32\%$ ). Perubahan volume ini menyebabkan matriks mengembang dan terjadi retak (*microcracks*). Selanjutnya proses oksidasi-reduksi yang berlangsung secara terus menerus menyebabkan pecahnya pelet menjadi serbuk. Hasil proses oksidasi – reduksi kering yang berupa serbuk kemudian dilakukan penyinteran dan dipress untuk dibuat pelet bahan bakar dan dirakit ulang untuk dijadikan bahan bakar CANDU. Daur bahan bakar DUPIC ini mempunyai beberapa kelebihan, diantaranya : lebih sederhana dibanding dengan teknik proses olah ulang dengan cara basah, lebih murah dan tidak mudah diselewengkan untuk persenjataan nuklir sebab produk-produk fisi yang sangat radioaktif maupun bahan fisil tidak dipisahkan. Selanjutnya karena beban panas dari bahan bakar DUPIC bekas ini sama dengan bahan bakar bekas PWR awal, sehingga kebutuhan penyimpanan akhir (disposal) tidak meningkat.



Gambar 4. Diagram Alir Proses DUPIC[6]

#### IV. PEMBAHASAN

Proses Olah Ulang yang menjadi inti dari daur bahan bakar tertutup merupakan proses pemungutan kembali bahan fisil yang ada dalam bahan bakar bekas untuk difabrikasi ulang dan digunakan dalam reaktor. Uranium yang terdapat pada bahan bakar bekas PWR merupakan uranium pengayaan rendah yang dapat digunakan kembali untuk bahan bakar DUPIC. Dewasa ini proses pemisahan cara kering menjadi perhatian para peneliti, seperti *pyroprocessing* dan proses mekanik-termal yang dilakukan dalam fabrikasi bahan bakar DUPIC. Bila ditinjau dari segi teknologi, maka proses fabrikasi bahan bakar DUPIC merupakan proses yang lebih sederhana bila dibandingkan dengan fabrikasi bahan bakar MOX dari bahan bakar bekas PWR. Sebab pada pemrosesan bahan bakar DUPIC hanya dilakukan proses pemisahan cara kering dengan cara mekanik – termal melalui proses oksidasi – reduksi pada temperatur tinggi dengan tujuan selain membuat pelet bahan bakar bekas menjadi serbuk juga untuk menguapkan produk fisi yang bersifat volatil. Pada umumnya kandungan produk fisi pada bahan bakar bekas setelah proses fabrikasi bahan bakar DUPIC lebih kecil dibanding sebelum dilakukan proses fabrikasi bahan bakar DUPIC. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan Produk fisi sebelum dan setelah dilakukan proses fabrikasi DUPIC[7]

Nuklida	Satuan	PWR (sebelum)	DUPIC (setelah)
Cs- 134	MBq/ gU	24	Tidak terdeteksi
Cs- 137	MBq/ gU	2420	16
Eu- 154	MBq/ gU	100	25
Eu- 156	MBq/ gU	24	5
Am- 241	MBq/ gU	89	99
Tc- 99	MBq/ gU	0,4	0,2
Dy	ppm	1,5	93
Gd	ppm	123	82
Eu	ppm	114	102
Sm	ppm	733	686
Pr	ppm	2	<2
Nd	ppm	3614	3440
Pr	ppm	1003	958
Ce	ppm	2121	2016
La	ppm	1094	1049
Rh	ppm	442	<650
Pd	ppm	1384	1450
Mo	ppm	3010	2873
Ru	ppm	2038	<1400

\* perhitungan menggunakan ORIGEN

\*\* menggunakan analisa kimia

Pada proses pemisahan cara basah (*wet reprocessing*) yang dewasa ini banyak digunakan adalah PUREX (plutonium uranium extraction), UREX (uranium extraction). Proses tersebut merupakan metode pemisahan uranium dan plutonium dengan proses kimia dimana bahan bakar bekas dilarutkan dalam asam nitrat[8]. Tetapi akhir-akhir ini proses tersebut mulai ditinggalkan sebab dapat memisahkan plutonium dan uranium secara murni sehingga mudah

diselewengkan ke arah persenjataan nuklir. Bila ditinjau dari segi ekonomi, proses olah ulang dipandang menguntungkan sebab dapat menghemat cadangan uranium alam. Daur bahan bakar DUPIC dapat mengurangi kebutuhan uranium alam  $\pm 25\%$  dibandingkan dengan sistem pembuangan limbah secara langsung dalam sistem daur bahan bakar terbuka. Pada daur bahan bakar DUPIC, bahan bakar bekas PWR dengan derajat bakar 35 MWd/ kg akan diproses menjadi bahan bakar CANDU dengan tambahan derajat bakar  $\pm 15$  MWd/ kg[6], karena itu  $\pm 40\% - 60\%$  energi lebih dapat dihasilkan dari bahan bakar PWR dengan membakar kembali bahan bakar bekasnya sebagai bahan bakar DUPIC sehingga dapat memaksimalkan penggunaan uranium serta mengurangi volume limbah yang akan dibuang. Disamping itu, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, daur bahan bakar DUPIC merupakan pilihan yang kompetitif bila dibanding dengan model penyimpanan langsung maupun proses olah ulang pada daur bahan bakar MOX.

Tabel 2. Perbandingan Biaya Daur Bahan Bakar[7]

Pilihan	Biaya (mills/ kWh)
DUPIC	5,88
Pembuangan Langsung	5,934
Pemrosesan ulang ( <i>Reprocessing</i> )	6,674

Namun demikian, disamping berbagai keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan daur bahan bakar DUPIC seperti tidak diperlukan pembuangan bahan bakar bekas PWR, penghematan cadangan uranium alam dan peningkatan derajat bakar CANDU dengan menggunakan bahan bakar DUPIC, bahan bakar DUPIC juga menghadapi sejumlah tantangan meliputi pengembangan teknologi peletisasi untuk memproduksi pelet dengan densitas tinggi, pengembangan peralatan fabrikasi menggunakan remote yang akan digunakan dalam hot sel sehubungan dengan material radioaktivitas tinggi selama proses.

## V. KESIMPULAN

Daur bahan bakar DUPIC (Direct Use of PWR spent fuel In Candu) merupakan salah satu jenis daur bahan bakar tertutup yang memiliki prospek, baik ditinjau dari segi teknologi maupun ditinjau dari segi ekonomi serta merupakan teknologi yang cukup aman untuk pertahanan kearah penyebaran penggunaan senjata nuklir. Namun demikian terdapat tantangan yang dihadapi dalam daur bahan bakar DUPIC yaitu pengembangan teknologi peletisasi untuk memproduksi pelet dengan densitas tinggi, pengembangan peralatan fabrikasi menggunakan remote yang akan digunakan dalam hot sel sehubungan dengan penanganan material radioaktivitas tinggi selama proses.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. Jernkvist, L.O., Massih A.R. et.al, "Evaluation of fission product gas release and the impact of fuel microstructure at high burnup", September 8-13, 2002, Storefjell, Gol, Norway.
2. Ryskamp, J.M., " Nuclear Fuel Cycle Closure", IEEPower Engineering Society Meeting". April 28, 2003.
3. Graves, H.W.Jr., " Nuclear Fuel Management", Jhon Wiley & Sons, New York, 1979.
4. Application Of Technology, The Nuclear Fuel Cycle", 2002
5. [Http://en.wikipedia.org/wiki/CANDU](http://en.wikipedia.org/wiki/CANDU), "CANDU reactor"
6. Sullivan, J.D., Ryz,M.A., Lee,J.W. " AECL'S Progress in DUPIC Fuei Development.", AECL, Chalk River Laboratories, Chalk River, Canada KOJ 1PO
7. Sullivan, P.G. Boczar et,al, " Benefits of The Dupic Fuel Cycle Strategy", Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Laboratories, Canada KOJ 1JO
8. Wydler,P., Baetsle, L.H., " Closing The nuclear Fuel Cycle : Issues and Perspectives", Ch-3003 Bern, Switzerland.